

東支那海의 1978年 夏季 颱風海溢의 算定

崔 秉 昊

成均館大學校 土木工學科

Computation of the Typhoon Surges of July-August 1978 in the East China Sea

Byung Ho Choi

Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 170

要約: 1978年 夏季의 두 颱風海溢의 動的인 狀況이 黃海와 東支那海의 垂直積分된 有限差分모델에 依해 檢討되었다. 모델에 依해 算定된 海溢高는 우리나라 西海岸의 主要檢潮所(仁川, 群山, 木浦, 濟州, 麗水港)에서의 觀測結果와 比較檢討되었다. 初期結果가 提示되고 討議되었다. 이 海溢研究는 東支那海의 Seasat 衛星 高度計資料의 更正作業을 하는 過程에서 遂行되었다.

Abstract: Two Typhoon surges generated during the period of July-August 1978 are investigated dynamically using a vertically-integrated finite-difference model of the Yellow Sea and the East China Sea. Computed residuals are compared with hourly records from selected tide gauges (Inchon, Kunsan, Mokpo, Jeju, Yeosu) along the coast of Korea. Some of the preliminary results are presented and discussed. This initial hindcast study has been undertaken in association with SEASAT-A altimeter data correction work in the East China Sea.

序 言

過去 十餘年에 걸친 期間동안 暴風海溢(storm surge) 算定을 爲한 數值모델이 廣範圍하게 成功的으로 利用되어 왔으며 移動性 低氣壓 特別 颱風, Hurricane에 의해 被害를 입는 沿岸海洋 國들은 이러한 數值모델을 骨格으로하는 實際豫報體系(operational forecasting system)를 樹立하여 活用하는 段階에 있다. 우리나라의 境遇 每年 熱帶性低氣壓에 依한 颱風被害가 큰데 力學原理에 立脚한 颱風海溢豫報體系가 樹立되어 活用되지 못하는 理由로서는 颱風自體의 豫報가 어려우며 또한 颱風이 隨伴하는 風域의 推定을 信賴性있게 遂行하기 어려운 데 要因이 있다.

이러한 難點은 存在하나 過去의 颱風海溢에 對한 hindcast研究를 徹底하게 遂行하여 特異한 颱風經路 및 氣象狀況에 對한 東支那海와 黃海

의 沿岸海域의 反應形態를 糾明하는 研究가 一次의으로 必要하다. 一連의 徹底한 hindcast 研究結果들이 있으면 實際豫報를 統計的인 分析結果와 併合하여 遂行하는 方法과 氣象豫報資料를 直接 海溢모델에 入力하여 颱風海溢을 豫報하는 方法을 相互 檢討하여 適合한 技法을 選擇할 수 있을 것이다.

本 稿에 收錄된 颱風海溢의 數值모델實驗은 過去의 天氣圖資料에 依해 氣象入力資料를 抽出하여 모델을 利用하여 颱風海溢을 算定하고 制限된 觀測資料와 比較하여 適合性을 檢討하는 初期段階의 作業이었으며 一貫的인 海溢算定體系를 樹立하는 데 力點을 두었다. 1978年 夏季의 颱風期間이 選定되었는데 이는 이 期間에 Seasat-A mission의 高度計(altimeter) 資料가 있으므로 東支那海의 高度計資料更正作業과 關聯하여 本 研究도 遂行되었다.

이러한 一連의 研究는 颱風海溢豫報體系의 樹立이라는 防災의인 側面以外에도 氣象狀況에 依

해誘發되는陸棚海水의循環形態科明 및 이에關聯된動的堆積體系의研究와도密接한關係가있다. 黃海와東支那海의現場海流觀測을包含한廣範圍한國際共同海洋觀測프로그램이展開될展望이며沿岸海面觀測資料의交換도不遠間 이루어질 것으로보아追後의모델改善은樂觀的이다.

數值모델

球面座標上에形成된移流加速項과海面應力, 海底摩擦項, 海面氣壓勾配項을包含한非線形潮汐 및海溢모델의基本方程式은下記와 같다. (Flather, 1976; Davies, 1977)

$$\frac{1}{R \cos \phi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \lambda} (Hu) + \frac{\partial}{\partial \phi} (Hv \cos \phi) \right\} + \frac{\partial \xi}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \phi} - \frac{uv \tan \phi}{R} - 2\omega \sin \phi v + \frac{k_b u \sqrt{u^2 + v^2}}{H} - \frac{F_s}{\rho H} + \frac{1}{\rho R \cos \phi} \frac{\partial P_a}{\partial \lambda} + \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial \xi}{\partial \lambda} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{u^2 \tan \phi}{R} + 2\omega \sin \phi u + \frac{k_b v \sqrt{u^2 + v^2}}{H} - \frac{G_s}{\rho H} + \frac{1}{\rho R} \frac{\partial P_a}{\partial \phi} - \frac{g}{R} \frac{\partial \xi}{\partial \phi} = 0 \tag{3}$$

式(1)~(3)은垂直積分된水動力學的方程式인데 여기서,

- t 時間
- λ, ϕ 東經 및 緯度
- ξ 靜止海面上的海面水位
- h 靜止海面下的水深
- $H=h+\xi$ 總水深
- R 地球의 曲率半徑
- g 重力加速度
- ω 地球回轉의 角速度
- k_b 海底摩擦係數
- F_s, G_s λ, ϕ 方向의 바람에 依한 海面應力成分
- P_a 海面氣壓

u', v' 靜水面下 水深에서의 λ, ϕ 方向의 流速成分

u, v 水深平均된 流速成分으로 下記와 같다.

$$u = \frac{1}{h+\xi} \int_{-h}^{\xi} u'(z) dz, \tag{4}$$

$$v = \frac{1}{h+\xi} \int_{-h}^{\xi} v'(z) dz$$

上記式(1)~(3)은移流項의境遇 Roberts와 Weiss (1967)에 의해提示된 angled-derivative scheme을利用하여數值解를求하였다. 基本式(1)~(3)의有限差分形의式은 Fig. 1에提示된有限差分格子體系를利用하여黃海 및東支那海의潮汐 및海溢現象을研究하기 위해數值的으로 풀이되었는데仔細한數值解析에 의한解는 이미紹介되어 있으므로 여기서는省略키로 한다. 球面座標格子體系의格子間隔은緯度上 1/5 度, 經度上 1/4 度로서北緯 38 度에서約 12 海里이다. CFL安定條件이安定된計算을 위한指針으로利用되어 그결과決定된 Δt 는 225 秒로서 1 日當 384 個의 timestep을形成하였다. 海底摩擦

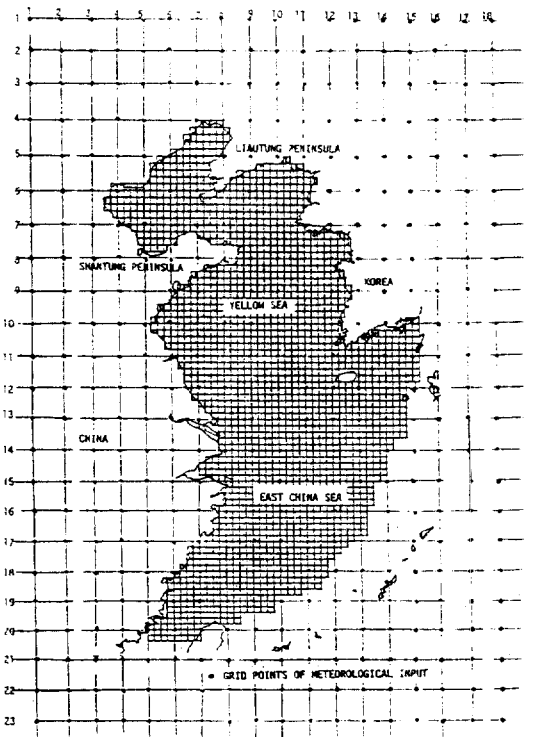


Fig. 1. Finite-difference grid of the East China Sea continental shelf sea model.

係數 k_b 는 一定한 값, 0.0025를 取하였다. 모델에 依한 ξ, u, v 의 算定은 $t=0$ 일 때 $\xi=u=v=0$ 인 初期靜止狀態로부터 出發하였는데 淺海에서는 海底의 摩擦消散率이 높아 初期攪亂效果가 빨리 除去되므로 hindcast하려는 始點보다 24後間前부터 模型算定을 始作하였다. 境界條件으로서 陸地境界에 直角인 方向의 流速은 없는 것으로 假定하고 外海境界面의 境界條件은 時間에 다른 海面水位 및 流速成分의 變化로서 規定한다. 即 開放境界面의 海面變化는 下記와 같다.

$$\xi(x, \phi, t) = \xi_T(x, \phi, t) + \xi_M(x, \phi, t) \quad (5)$$

여기서 ξ_T 는 潮汐에 依한 海面變化이며 ξ_M 은 氣象影響에 依한 海面變化이다. 調和理論에 立脚하여 ξ_T 는 下記式으로 提示된다.

$$\xi_T(x, \phi, t) = Z_0(x, \phi) + \sum_{i=1}^4 f_i H_i(x, \phi) \cos[V_i + \sigma_i t + U_i - g_i(x, \phi)] \quad (6)$$

여기서

- Z_0 平均海面
- f_i, U_i 振幅과 位相의 18.6年變化를 考慮한 nodal factor
- H_i 分潮 i 의 振幅
- σ_i 分潮의 速度
- V_i Greenwich에서 $t=0$ 에서의 平衡分潮에 相應하는 位相
- g_i 分潮의 遲角

인데 模型의 潮汐入力은 東支那海의 二次元潮汐 모델(Choi, 1980)에서 提示되었던 M_2, S_2, K_1 및 O_1 分潮가 利用되었으며 平均海面 Z_0 는 零을 取하였다. Nodal factor f_i, U_i 는 海溢算定期間의 첫날값을 取하였다. 開放境界面에서의 氣象에 依한 海面變化, $\xi_M(x, \phi, t)$ 는 靜水壓法則을 利用하였다.

$$\xi_M(x, \phi, t) = [\bar{p} - P_a(x, \phi, t)] / \rho g \quad (7)$$

여기서 \bar{p} 는 平均海面氣壓으로 1012mbar를 取했으며 $P_a(x, \phi, t)$ 는 時間 t 일때 陸棚모델의 開放境界面 x, ϕ 에서의 海面氣壓이다. 더불어서 模型內部의 攪亂效果가 外海로 境界面을 통해 波 汲되어 나갈수 있도록 放射條件을 考慮하였는데 水深平均된 流速 q 와 海面 ξ 와의 關係로서 提示할 수 있다.

$$q = q_T + q_M + \frac{c}{h} (\xi - \xi_T - \xi_M) \quad (8)$$

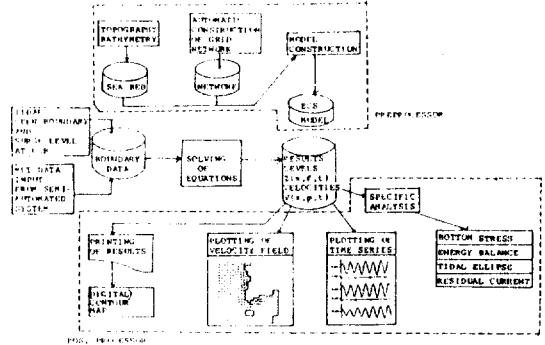


Fig. 2. Block diagram for computing surges in the Yellow and East China Seas.

여기서 $c = (gh)^{1/2}$, ξ_T 는 (6)式으로 賦與된다. $q_M=0$ 을 取하며 q_T 는 下記式으로 決定된다.

$$q_T = \sum_{i=1}^4 f_i \theta_i \cos(\sigma_i t + V_i + U_i - \gamma_i) \quad (9)$$

여기서 θ_i 는 i 分潮의 潮流成分의 振幅이며 γ_i 는 位相이고 f_i, σ_i, V_i 및 U_i 는 既定義된 바 같은데 二次元潮汐모델에서 決定된 값들을 一次의 으로 取하였다. 模型은 潮汐과 氣象狀況을 함께 賦與(tide with surge)하여 算定할 수 있으며 또한 單獨의 으로 潮汐(pure tide)과 海溢(pure surge)을 算定할 수 있도록 設計되었으며 算定 結果는 一連의 過程이 體系의 으로 處理될 수 있도록 하였는 바 全體의인 概略圖가 Fig. 2에 提示되어 있다. 前回의 潮汐모델研究(Choi, 1980)에서 算定된 M_2, S_2, K_1 및 O_1 分潮의 潮位가 沿岸 觀測結果와 比較되었는 데 一般的으로 滿足한 一致를 보았으며 Larsen과 Cannon(1983) 亦是 北緯 32度 近海에서 觀測한 潮流가 模型의 算定潮流와 一般的인 一致를 하고 있어 採擇된 外海境界面의 潮汐入力이 信賴性이 있음을 立證한 바 있다.

氣象資料

式 (2)(3)을 풀이하기 爲해서는 海溢算定期間을 통해 模型의 每 格子點마다 氣象條件에 依한 外力項인 海面風에 依한 應力成分 F_s, G_s 와 大氣 壓勾配 P, Q ($P = \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial P}{\partial x}$, $Q = \frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial \phi}$)를 算定해야 한다. 이 海域의 大氣數值豫報모델에 依한 氣壓資料가 現在에는 利用可能하지 않으므로 中央氣象臺의 每 6時間 天氣圖로 부터 颶風中心의 移動經路에 따라 每時間別 氣壓分布

를 導出하고 digitizer를 利用하여 等壓線을 digitizing한 後 gridding 技法을 利用하여 Fig. 1에 提示된 每 $1^\circ \times 1^\circ$ 格子의 氣壓을 抽出한 後 이를 다시 補間하여 模型内部의 每格子마다 海面氣壓을 取하는 從屬的인 處理過程을 取하였다. 다음 段階로는 算定된 每格子의 海面氣壓勾配로부터 地衡風算出式에 依해 地衡風을 算出한 다음 一連의 交換係數를 適用하여 海面風을 算定하였는데 交換係數는 Hasse와 Wagner(1974)가 提示한 經驗值를 使用하였다.

$$W_s = A\hat{W} + B \quad (10)$$

여기서 W_s 및 \hat{W} 는 各已 海面風 및 地衡風의 強度(m/sec)이며 $A=0.443$, $B=2.92$ 이다. 地衡

風의 方向과 實際 海面風이 이루는 角은 大氣溫度와 海水溫度와의 差에 依해 提示(Findlater等, 1966; Duun-Christensen, 1975)될 수 있으나 이 期間의 資料가 없어 現段階에서는 20° 를 取하였다. 海面風으로 부터 海面應力을 算定하기 爲해 서 지금까지 報告된 바람의 抗力係數들을 檢討한 結果 Wu(1980, 1982)의 報告值가 最近까지의 資料를 利用한 것이며 適用風速의 範圍도 크므로 이를 取하였다.

$$C_D \times 10^3 = 0.80 + 0.065 W_s, \quad 0 < W_s < 50 \quad (11)$$

上記의 一連의 過程에 依해 每時間別 氣壓勾配 및 海面應力分布가 模型의 各格子點마다 即 P 와 F_s 는 東向成分流速(u)算定點, Q 와 G_s 는 北

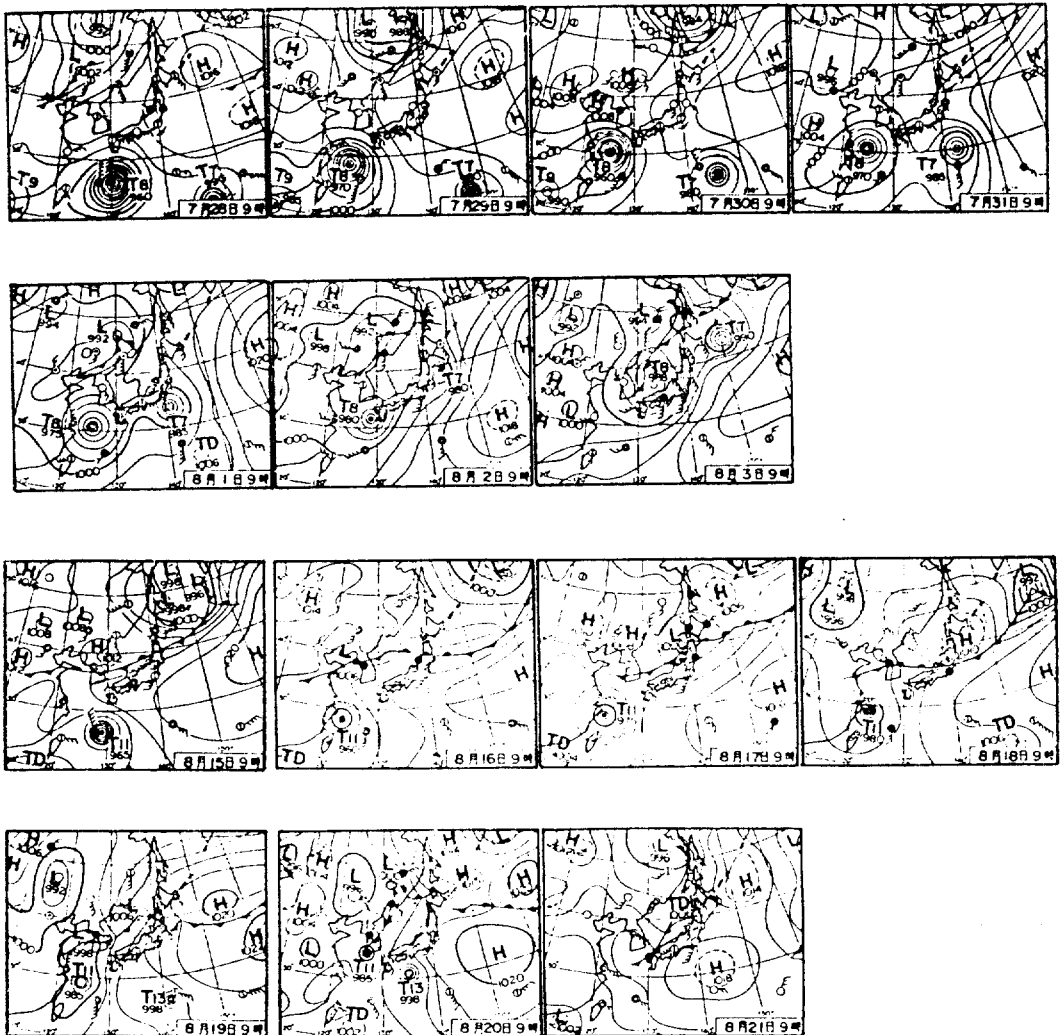


Fig. 3. Weather charts of the Typhoons Wendy and Carmen in 1988.

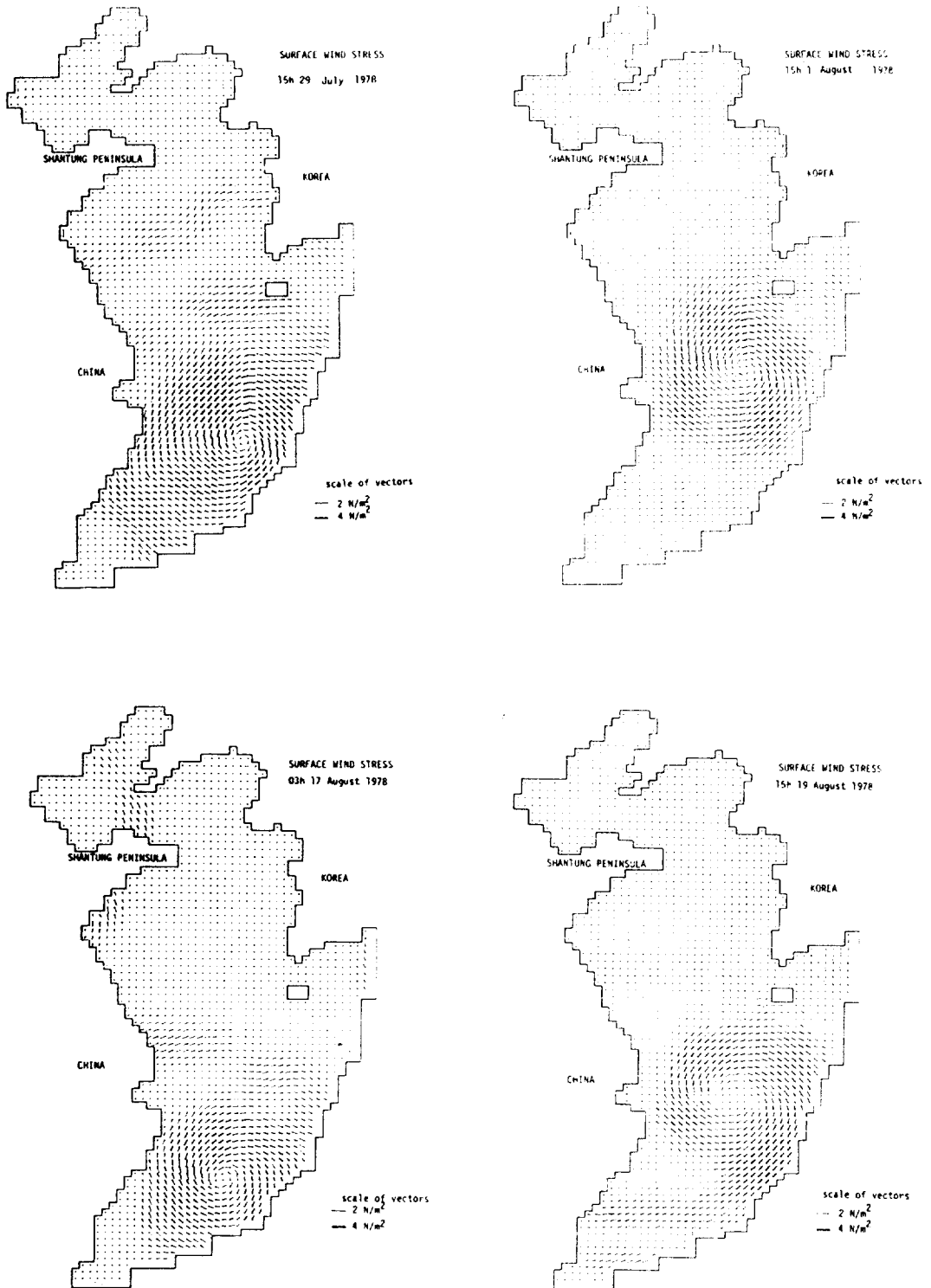


Fig. 4. Examples of computed wind stress driven by the Typhoon surges in 1978.

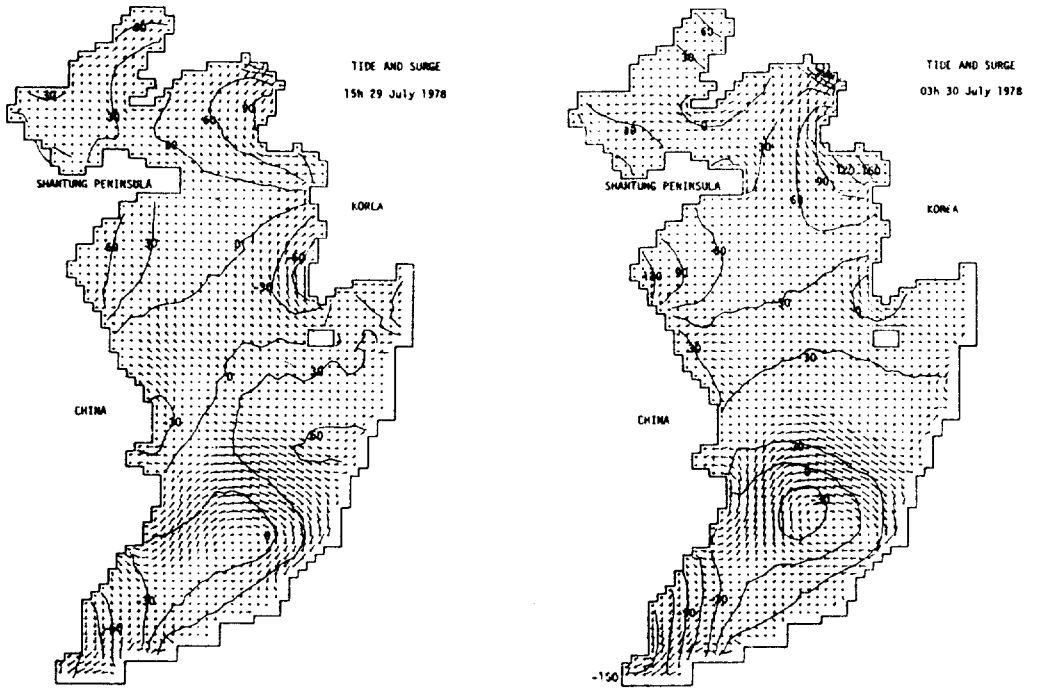


Fig. 5(a)

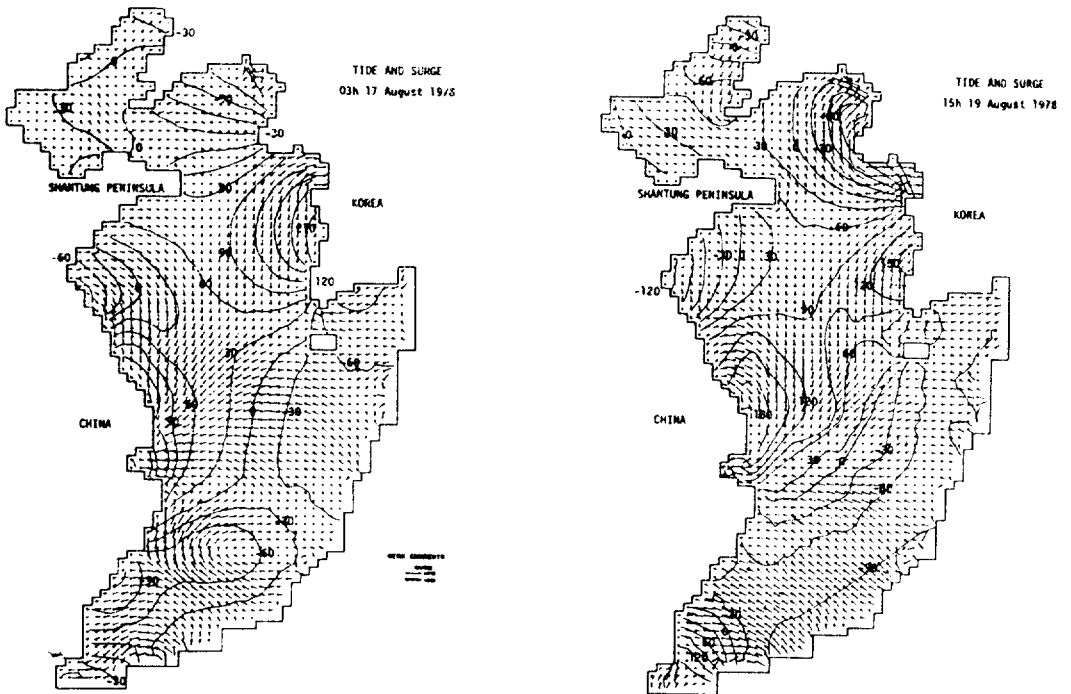


Fig. 5(b)

Fig. 5. Computed water level and currents produced by the tide and Typhoon surges.

向成分流速(v)算定點, P_0 는 開放境界面 格子의 ξ 算定點에 두 颱風海溢期間(78年 7月 28日~8月 2日, 78年 8月 15日~8月 21日)동안 作成되어 氣象入力資料의 時系列이 形成되었는데 이 過程에 依해 算定된 風域이 滿足스러워야 信賴性 있는 海溢의 算定이 遂行될 수 있다.

Fig. 3은 颱風 8號(Wendy號) 및 11號(Carmen號)가 東支那海上을 通過한 후 九洲北端 및 우리나라 南海岸으로 빠져나가는 夏季의 典型的인 氣象形態를 提示하는 天氣圖이다. Fig. 4는 前述한 過程에 依해 算定된 海面風의 應力分布를 提示하는데 颱風中心圈周圍의 反時計方向의 應力分布가 잘 提示되고 있다.

颱風海溢算定

모델算定은 두 颱風海溢에 對해 各己 潮汐과 氣象條件을 함께 賦與한 算定(RUN 1)과 潮汐만(pure tide)의 算定(RUN 2)이 遂行되어 潮汐과의 相互作用이 考慮된 海溢算定은 前者에서 後者를 每格子點, 每時間間隔마다 減해서 抽出(RUN 3)하였다. Fig. 5는 潮汐과 氣象條件을

함께 賦與한 RUN 1의 結果를 例示한 것인데 算定된 海面(cm)分布와 海流가 同時에 提示되어 있다. 颱風中心圈의 海面上昇 및 反時計方向의 渦流形狀이 잘 例示되어 있다. Fig. 6과 그림 7은 RUN 1의 時系列에서 仁川, 群山, 木浦, 濟州, 麗水港의 算定結果와 檢潮所의 觀測值와 比較한 것이다. 潮差가 큰 仁川港과 群山港에서는 低, 高潮位附近의 算定值와 觀測值와의 誤差가 크며 木浦港의 境遇는 位相誤差가 있다. Fig. 8은 RUN 3의 結果에서 海溢高(cm)의 分布와 海溢에 依한 海流分布를 抽出하여 提示한 것인데 長江(揚子江)河口에 1m가 넘는 海溢尖頭가 發生하는 것을 提示하고 있으며 海溢에 依한 反時計方向의 海流強度도 強하게 提示되어 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 算定된 우리나라 西海岸 檢潮所(仁川, 群山, 木浦, 濟州, 麗水港)의 海溢高와 觀測海溢高와의 比較이다. 觀測海溢 時系列은 每時間檢潮位時系列에서 推定潮位時系列을 減해서 求한 것으로 前回の 研究(韓國測地學會, 1983)에서 整備된 dataset으로부터 取하였다. 提示된 바와 같이 全體的인 程度만이 觀測

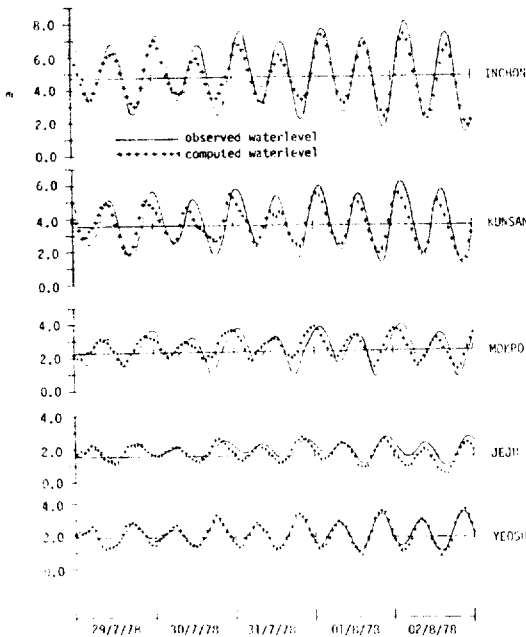


Fig. 6. Comparison of observed and computed water levels during the Typhoon Wendy period.

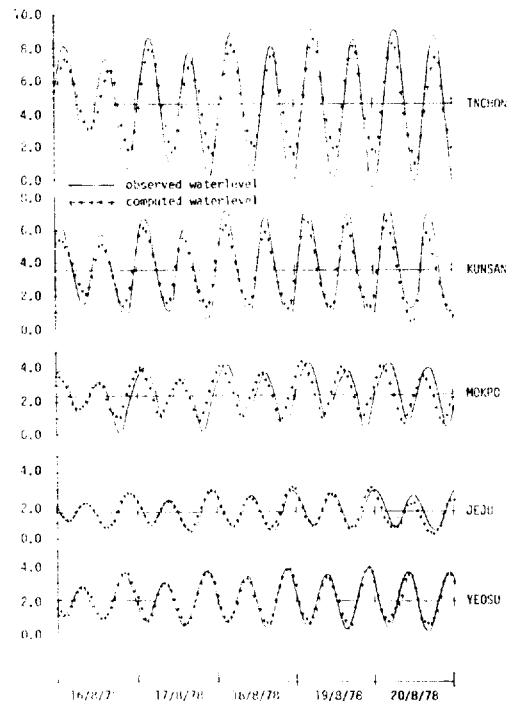


Fig. 7. Comparison of observed and computed water levels during the Typhoon Carmen period.

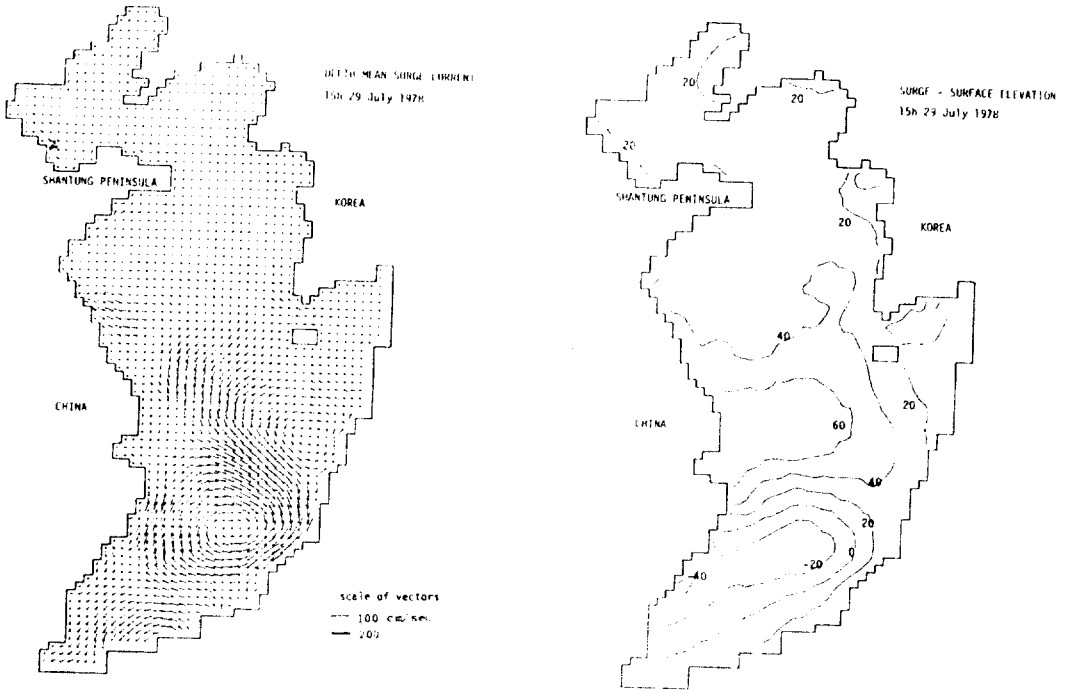


Fig. 8(a)

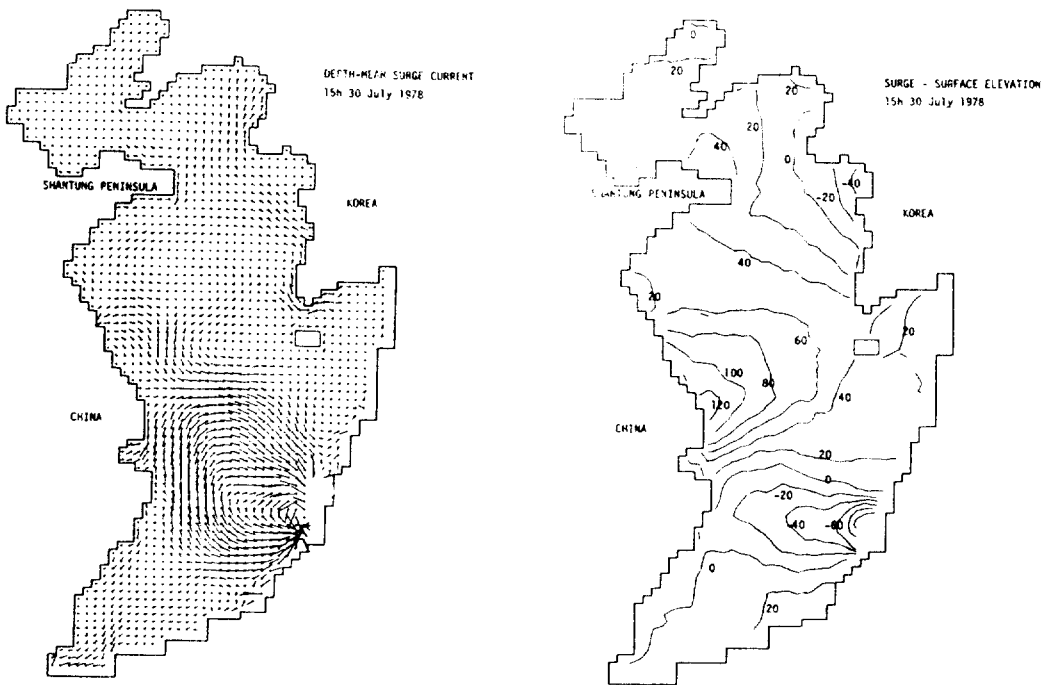


Fig. 8(b)

Fig. 8. Computed surge elevations and currents produced by the Typhoon surges in 1978.

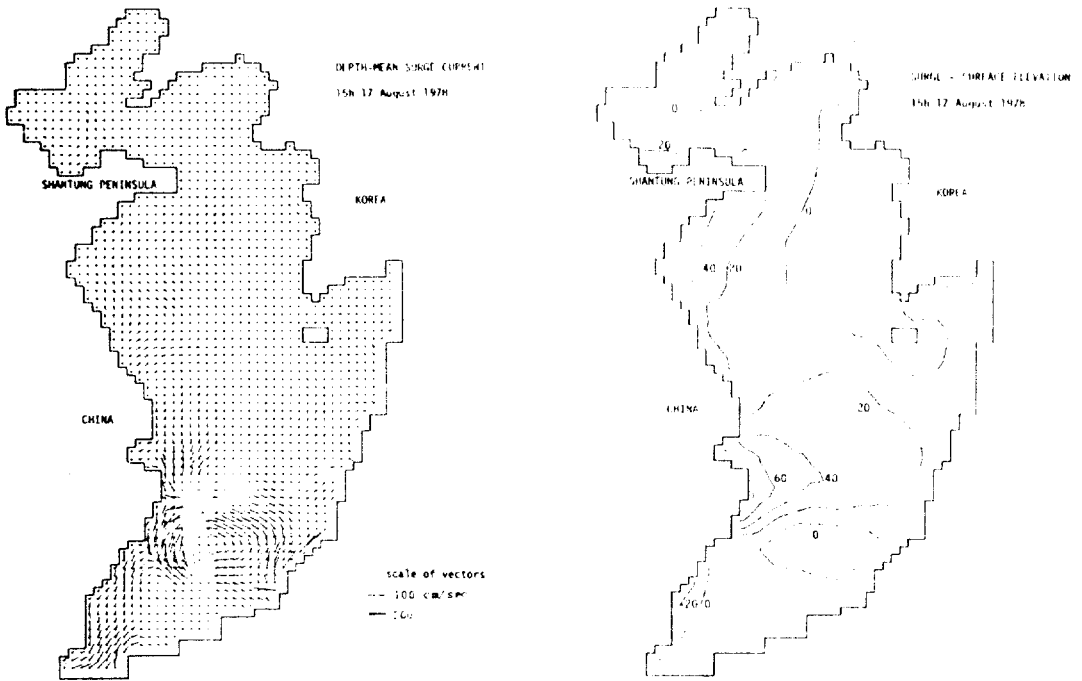


Fig. 8(c)

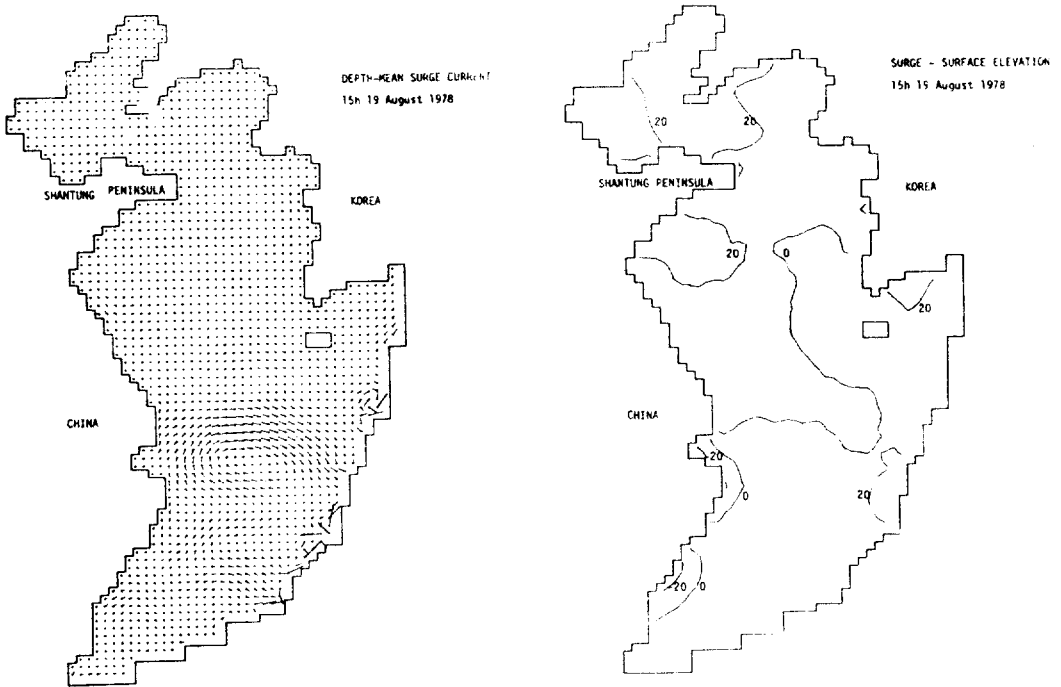


Fig. 8(d)

Fig. 8. Continued.

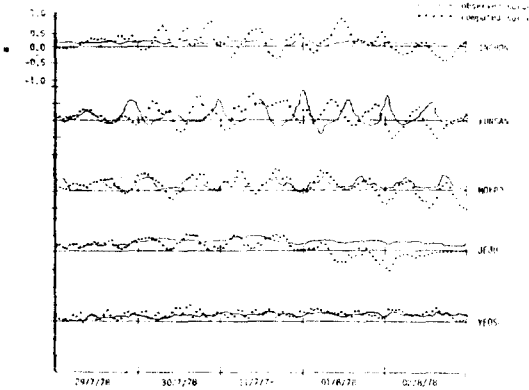


Fig. 9. Comparison of observed and computed surges during the Typhoon Wendy period.

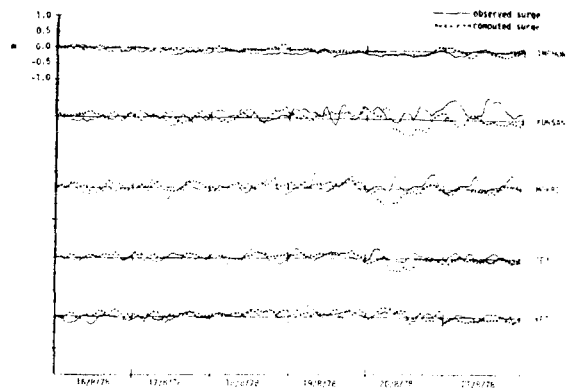


Fig. 10. Comparison of observed and computed surges during the Typhoon Carmen period.

值와 類似하게 算定되었다. 現在 모델은 颱風의 風域을 모델 入力形態로서 短時間에 더 信賴性 있게 算定하는 改善過程이 遂行되고 있다. 아마도 現在の 抽出過程에 모델 颱風의 概念(Graham等, 1959)을 結合시키는 方法이 適合할 것으로 생각된다. 算定된 海面 및 海溢高를 徹底히 檢證하기 爲해서 中國沿岸의 觀測值를 確保하여 統計的 誤差評價를 遂行하는 일이 必要하다. 前回の 潮汐모델研究(Choi, 1980)의 境界面 潮汐入力の 敏感度分析에서 모델 内部 潮汐算定에 큰 影響을 주는 境界條件인 29°12'N, 127°12'E와 31°24'N, 128°15'E 사이의 潮汐入力が 陸棚潮位觀測을 통해 確認, 改善되어야 할 것이 提示된다.

結 言

前回の 一連의 研究에서 報告되었던 東支那海 陸棚모델은 여러 段階의 改善을 거쳐서 本 研究에 提示된 바와 같이 海溢의 hindcast를 遂行할 수 있는 段階로 進前되었다. 初期結果로서는 滿足스러운 算定이 이루어졌다. 그러나 氣象 入力 資料의 改善, 모델 全域에 걸친 觀測海面 및 海流觀測資料에 依한 徹底한 檢證等이 繼續 遂行되어야 할 問題로서 남아있으며 颱風中心圈을 더 잘 解像시킬 수 있는 精密格子體系의 모델로서의 改善도 考慮되어야 할 事項이다.

이러한 一連의 研究는 海洋資源開發에 依한 海洋에서의 惠澤側面과 더불어 海洋에 依한 自然環境의 破壞的要素를 輕減시켜야 한다는 側面에서 重要한 研究이다.

謝 辭

本 研究는 1983年度 韓國學術振興財團의 研究 費支授에 依해 遂行되었다.

參 考 文 獻

Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea. Korea Ocean Research and Development Ins. (KORDI), Rep. 80-02, 72p.

Davies, A.M., 1977. A numerical model of the North Sea and its use in choosing locations for the deployment of offshore tide gauges in the JONSDAP'76 oceanographic experiment. Dt. hydrogr. Z., 29, 11-24.

Duun-Christensen, J.T., 1975. The representation of the surface pressure field in a two-dimensional hydrodynamic numeric model for the North Sea, the Skageraak and the Kattegat. Dt. hydrogr. Z., 28, 97-116.

Findlater, J. et al., 1966. Surface and 900 mb wind relationships. Scientific papers of the Meteorological Office, London, 23, 41p.

Flather, R.A., 1976. A tidal model of the North-West European continental shelf. Memoires de la societe Royale des Sciences de Liege, Ser. 6, 10, 141-164.

Graham, H.H. and D.E. Nuun, 1959. Meteorological considerations pertinent to Standard Project Hurricane, Atlantic and Gulf coast of U.S.A.. U.S. Weather Bureau, N.H.R.P., Rep. 33.

Hasse, L. and V. Wagner, 1974. On the relation-

- ship between geostrophic and surface wind at sea. *Month. Weather Rev.*, Wash., 99, 351-383.
- Larsen, L.H. and G.A. Cannon, 1983. Tides in the East China Sea. Paper presented to Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, April 1983, Hangzhou, China.
- Roberts, K.V. and N.O. Weiss, 1967. Convective difference schemes. *Math. Comput.*, 20, 272-299.
- Wu, J., 1980. Wind stress coefficients over sea surface near neutral conditions: A revisit. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 727-747.
- Wu, J., 1982. Wind stress coefficients over sea surface from breeze to Hurricane. *J. Geophys. Res.*, 87, C12, 9704-9706.
- 韓國測地學會, 1983. 우리나라 精密水準網에 關한 研究(우리나라 主要港灣의 平均海面 및 潮位分析).